



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Discente: Elayne Louise Firmino Machado Freitas

Orientador: Fernando Silva Albuquerque

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO

OBTENÇÃO DA CURVA MESTRA DO MÓDULO DINÂMICO COM
USO DO ENSAIO DE RESSONÂNCIA POR IMPACTO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS

São Cristóvão - SE

Julho de 2017

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Objetivos.....	4
1.1.1	Objetivo Geral.....	4
1.1.2	Objetivos Específicos	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Revestimento asfáltico.....	5
2.1.1	Ligante Asfáltico	5
2.1.2	Agregados.....	7
2.2	Dosagem	8
2.3	Caracterização das misturas asfálticas.....	10
2.4	Módulo Dinâmico.	10
2.4.1	Determinação do Módulo Dinâmico.....	11
2.4.1.1	Ensaio de Ressonância por Impacto	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1	Materiais.....	16
3.2	Métodos.	17
3.2.1	Ensaio de Compressão Axial Dinâmico (CAD)	17
3.2.2	Ensaio de Ressonância por Impacto (RI).....	18
3.2.2.1	Equipamento utilizado	20
3.2.3	Comparação entre as Curvas Mestras de cada ensaio	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1	Curva Mestra do Módulo Dinâmico para o Ensaio de Compressão Axial Dinâmico (CAD)	23
4.2	Curva Mestra do Módulo Dinâmico para o Ensaio de Ressonância por Impacto (RI).....	25
4.2.1	Cálculo do Módulo Dinâmico	26
4.2.2	Construção da Curva Mestra	27
4.3	Comparativo entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do ensaio de Compressão Axial Dinâmico e de Ressonância por Impacto.	29
4.4	Análise do teor de ligante.....	33
5	CONCLUSÃO	35
6	ATIVIDADES COMPLEMENTARES.....	36
	REFERÊNCIAS.	37

1 INTRODUÇÃO

Um breve histórico da pavimentação também se refere à história da humanidade. Segundo historiadores, estradas já eram implantadas há dois mil anos a.c., não propostas a veículos com rodas, mas designadas a facilitar o transporte de cargas pelos trenós. Com o passar dos séculos as estradas tornaram-se ainda mais necessárias, tanto devido ao aumento do tráfego, com o surgimento dos veículos, quanto para a necessidade de deslocamentos, que se tornou cada vez mais presente com a globalização.

Inicialmente não havia uma preocupação com a criação e conservação das estradas. Foi a partir do fim do século XII que se reconheceu a relevância do transporte no comércio, em virtude da velocidade de viagem. No Brasil, somente em 1860 inaugurou-se a primeira estrada a usar macadame como base/revestimento. Antes disso calçavam-se as ruas com pedras importadas de Portugal. Em 1950, em consequência da criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN), marcou-se o início da execução de pavimentos em escala industrial e da organização de grandes firmas construtoras (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O pavimento é uma estrutura que tem o papel de resistir aos esforços provenientes do tráfego e do clima, além de promover aos usuários conforto e segurança em sua utilização. Pode ser classificado como rígido, quando o revestimento é de concreto-cimento, ou flexível, quando o revestimento é feito com uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. Este é formado por um conjunto de camadas, cada uma com sua função: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (Abeda), mais de 90% das estradas pavimentadas no Brasil são de revestimento asfáltico (INFRAESTRUTURA URBANA, 2011). Com a evolução das cargas de tráfego é notável a necessidade da melhoria da qualidade do pavimento, pois cada vez mais cedo aparentam defeitos, o que resulta em sua durabilidade reduzida.

O presente trabalho tem como objeto de estudo o revestimento asfáltico e visa à obtenção da curva mestra do módulo dinâmico com o uso do ensaio de ressonância por impacto (RI) em misturas asfálticas. O módulo dinâmico representa a relação entre tensão e deformação do material viscoelástico, ou seja, indica de que maneira ele se deforma quando sujeito a um carregamento. Tornando-se assim imprescindível para a caracterização das misturas asfálticas no dimensionamento estrutural de pavimentos. O método RI se destaca pela sua simples execução, eficiência e economia em relação ao convencional, o de Compressão Axial Dinâmico, além de ser adequado para ser utilizado em canteiros de obras de pavimentação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliação da aplicabilidade do ensaio de ressonância por impacto na obtenção de curva mestra de módulo dinâmico em misturas asfálticas utilizadas em obras de pavimentação.

1.1.2 Objetivo Específico

- Verificar quais valores de temperatura, a partir de 20°C, caracterizam melhor a curva mestra (região de baixa frequência reduzida).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Revestimento asfáltico

É a camada superior, mais suscetível à deterioração devido à ação climática e responsável por receber diretamente as cargas geradas pelo contato pneu-pavimento, as quais variam com sua magnitude e velocidade. Deve resistir aos esforços e transmiti-los de forma reduzida às camadas subjacentes, além de impermeabilizar o pavimento, melhorar as condições de rolamento, resistir à derrapagem, à fadiga e ao trincamento térmico (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Em geral utiliza-se uma única camada de mistura asfáltica como revestimento. Esta, por sua vez, é composta por agregados de vários tamanhos e proporções que são unidos por um ligante asfáltico. Tal mistura garante a qualidade e requisitos técnicos de acordo com seu projeto de dosagem, combinada com as outras camadas, seguindo o projeto da estrutura do pavimento e suas especificações. Ao associar o ligante asfáltico aos agregados, se executadas e aplicadas apropriadamente, originam-se estruturas duráveis em sua vida útil (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.1.1 Ligante asfáltico

O asfalto é um material betuminoso formado por hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, sendo o último considerado mais econômico e mais puro em relação ao primeiro (BETUSEAL, 2014). Na construção é um dos materiais mais utilizados, em especial na pavimentação por apresentar impermeabilidade, durabilidade, além de ser resistente à maioria das reações químicas e proporcionar excelente união entre os agregados, como um ligante (BERNUCCI *et al.*, 2006).

No Brasil esse ligante denomina-se CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e todas as suas propriedades físicas estão associadas à temperatura: semi-sólido a baixas temperaturas, viscoelástico a temperatura ambiente e fluido a altas temperaturas; tais transições são reversíveis. Pode ser caracterizado como termoviscoelástico, suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade do carregamento, além da temperatura. Existem vários tipos de CAP e são classificados através de ensaios de durabilidade, de pureza, de segurança e de consistência, sendo os principais a dureza e viscosidade (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A dureza do asfalto é verificada através de um ensaio de penetração (ABNT NBR 6576/98). Este mede a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra com certo volume de CAP, a uma temperatura de

25°C. Quanto maior a penetração da agulha, menos consistente ele é. Esta classificação tem sido utilizada na especificação dos cimentos asfálticos em todos os países do mundo. A viscosidade, outra característica muito relevante do material, é verificada através do viscosímetro Brookfield que mede a viscosidade dinâmica, expressando-a em centipoise (cP). Também conhecida como viscosidade rotacional (ABNT NBR 15184), possibilita obter o gráfico de temperatura-viscosidade para o projeto através do comportamento do fluido a diferentes tensões e taxas de cisalhamento, quando há a rotação de cilindros coaxiais mergulhados na amostra (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Os CAPs utilizados neste trabalho são classificados como CAP 30/45 (mais duro), o CAP 50/70 (mediano) e o CAP 60/85 (menos duro), cujas especificações detalhadas são observadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Resolução 32 da ANP, de 21/09/2010. Regulamento Técnico nº 04/2010 publicado no Diário Oficial da União em 22/09/2010. Norma DNIT 129/2010 EM.

GRAU (ponto de amolecimento min. / Recuperação Elástica min.)		FLEXPAVE		
		55/75	60/85	65/90
ENSAIOS NA AMOSTRA VIRGEM:	MÉTODO ABNT	LIMITE DE ESPECIFICAÇÃO		
Penetração 25°C, 5s, 100g, dmm	NBR-6576	45 a 70	40 a 70	40 a 70
Ponto de Amolecimento min., °C	NBR-6560	55	60	65
Ponto de Fulgor, mín.	NBR-11341	235	235	235
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx., cP	NBR-15184	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx., cP	NBR-15184	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 rpm, máx., cP	NBR-15184	1000	1000	1000
Ensaio de Separação de Fase, máx., °C	NBR-15166	5	5	5
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín., %	NBR-15086	75	85	90
ENSAIO NO RESÍDUO DO RTFOT				
Variação de massa, máx., %	NBR-15235	1	1	1
Variação do PA, °C máx.	NBR-6560	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Percentagem de Penetração Original, mín.	NBR-6576	60	60	60
Percentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín.	NBR-15086	80	80	80

Fonte: GRECA ASFALTOS, 2011.

Tabela 2 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) segundo a Resolução nº19 de 11 de julho de 2005 da ANP.

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25, °C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de Amolecimento	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol	s					NBR 14950	E 102
a 135°C		192	141	110	80		
a 150°C		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135°C, SP 21, 20rpm min		374	274	214	155		
a 150°C, SP 21, min		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21 min		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Susceptibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de Fulgor mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, min	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25 °C, min.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 153 °C, 85 min							D 2872
Varição em massa, máx	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
Ductilidade a 25 °C	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D113
Aumento do Ponto de Amolecimento	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração Retida (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

(*) relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração antes do ensaio.

Fonte: ABEDA (2006).

2.1.2 Agregados

São materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia e, normalmente, inertes. É preciso levar em conta a sua formação geológica (tipo de rocha, composição mineralógica, composição química, granulação, grau de alteração, tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão ao ligante) para conhecer o desempenho que terão quando associados aos ligantes asfálticos, pois juntos devem suportar os esforços atuantes na superfície e propagá-los em seu interior. Este comportamento será observado pelos ensaios de desempenho e pela experiência (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Além de algumas características tecnológicas importantes como a limpeza, resistência à abrasão, textura superficial, forma das partículas, absorção, adesividade, sanidade e densidade específica, sua classificação se dá em três grandes grupos: quanto à sua

natureza (natural, artificial e reciclado), tamanho (gráudo, miúdo e material de enchimento ou fíler) e distribuição dos grãos (graduação densa, aberta, uniforme e descontínua) (BERNUCCI *et al.*, 2006).

- Quanto à natureza: Naturais são como se encontram na natureza e podem ser obtidos por processos de desmonte, escavação e dragagem; Artificiais são resíduos de processos industriais, alguns podem apresentar problemas e requerer tratamento específico; Reciclados são os procedentes de reuso de outros materiais, com a pretensão de reduzir os problemas causados na acomodação destes resíduos.
- Quanto ao tamanho: Graúdo é o material que fica retido na peneira #10 (dimensões maiores que 2,0mm); Miúdo é o material que passa na peneira #10 e fica retido na #200 (dimensões entre 0,075mm e 2,0mm); Fíler é o material em que ao menos 65% passa na peneira #200. O tamanho máximo dos agregados pode prejudicar de diversas formas o desempenho do pavimento, de maneira que se forem muito pequenos podem dificultar a trabalhabilidade além da capacidade de compactação e, se muito grandes, podem causar segregação.
- Quanto à distribuição dos grãos: influencia diretamente no comportamento dos revestimentos asfálticos, principalmente em suas propriedades mecânicas, e é determinada por meio de uma análise de peneiramento. Nessa avaliação uma amostra seca de agregado é separada por meio de uma sequência de peneiras progressivamente menores, comparando as massas retidas em cada peneira com a massa total da amostra e expressando-as em porcentagem numa tabela ou gráfico. O agregado de graduação densa retrata uma distribuição granulométrica contínua, próxima à sua densidade máxima; graduação aberta apresenta distribuição granulométrica contínua, porém com escassez de material fino para preencher os vazios entre as partículas maiores; graduação uniforme aparenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita; graduação descontínua possui pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, muito sujeita à segregação.

2.2 Dosagem

As particularidades climáticas, alterações nos carregamentos e o aumento do tráfego, específicos para cada região, são alguns dos fatores que influenciam o progresso dos métodos de dosagem. Estes buscam representatividade, de forma que seus corpos de prova tenham características as mais semelhantes possíveis do encontrado em campo.

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na definição, por meio de procedimentos experimentais, de um teor “ótimo” (ou teor de projeto) de ligante asfáltico, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. O teor de projeto varia de acordo com o método de dosagem e depende de outros parâmetros como tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento será submetido etc. A compactação, que vai corresponder à densidade da mistura asfáltica em campo, pode ser realizada por impacto, amassamento, vibração ou rolagem e o formato da amostra pode ser cilíndrico, trapezoidal ou prismático (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Como mencionado, os corpos de prova manuseados no trabalho foram moldados no CENPES, quatro deles utilizando a granulometria Superpave e os outros dois com o uso da Marshall. A especificação Superpave ainda é pouco utilizada no Brasil e foi estabelecida no *Strategic Highway Research Program* (SHRP), para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas Norte Americanas. Tal metodologia, comprovadamente, se aproxima mais da realidade que a mais utilizada no Brasil: a dosagem Marshall. A maior diferença entre elas se encontra na forma de compactação, enquanto na Marshall é realizada por impacto, na Superpave é feita por amassamento (giros), entretanto os seis corpos de prova foram obtidos por meio de um compactador giratório. Além dessa, outra divergência se encontra na granulometria dos agregados, pois a Superpave apresenta conceitos de pontos de controle e zona de restrição. Os pontos de controle são limites que demarcam por onde a curva granulométrica deve passar. A zona de restrição foi proposta com a finalidade de garantir um mínimo de Vazios no Agregado Mineral (VAM) e também evitar que uma quantidade excessiva de areia natural seja usada na mistura, causando problemas na compactação e baixa resistência à deformação permanente (BERNUCCI *et al.*, 2006).

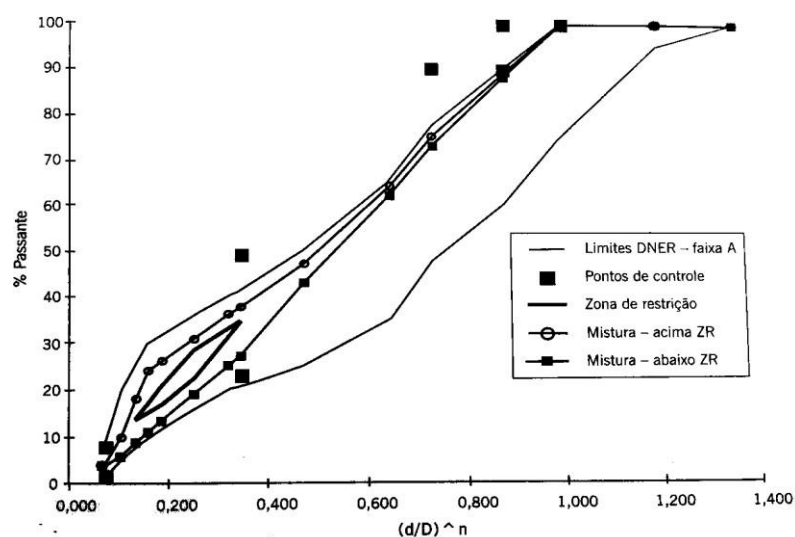


Figura 1 – Exemplo de granulometria num gráfico com pontos de controle e zona de restrição

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2006)

2.3 Caracterização das misturas asfálticas

É muito difícil descrever o comportamento dos materiais usados na pavimentação, porque as suas propriedades dependem de diversos aspectos, o que torna impossibilitada a simulação de alguns fenômenos em laboratório. Desta forma, para caracterizar as misturas asfálticas, realiza-se uma ponderação entre precisão e praticidade, privilegiando então os fatores mais relevantes na previsão do seu desempenho (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O pavimento deve combinar seus materiais e camadas, em conformidade com a rigidez de cada uma delas, de maneira que o conjunto estrutural responda satisfatoriamente às solicitações de tráfego que serão impostas. Estes sistemas em camadas estão expostos a cargas transientes, que geram tensões com formato de ondas senoidais. O conhecimento da rigidez do revestimento e das subcamadas possibilita a análise do pavimento como um todo e obtém valores das tensões, deformações e seus respectivos deslocamentos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Iniciaram-se nas últimas décadas o uso de métodos de dimensionamento que analisam a estrutura em camadas, compatibilizando as cargas solicitantes do tráfego com a capacidade de cada material. As misturas asfálticas herdaram o comportamento viscoelástico do ligante betuminoso, em razão disso apresentam respostas em função não somente da amplitude do carregamento, mas da frequência da carga aplicada, ou seja, diferentes reações para carregamentos estáticos e dinâmicos, ainda que submetidos a esforços de mesma intensidade (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O material viscoelástico, quando exposto à aplicação de pulsos de carga com menor duração aparenta maior rigidez, quando a duração é maior, a rigidez diminui. A duração do esforço está relacionada à velocidade dos veículos e o limite se dá no carregamento estático. A frequência desses pulsos é de suma importância, pois quanto maior, menor será o tempo entre os picos de carga. Além desses (duração e frequência do carregamento), observar a temperatura também é relevante, visto que com o seu aumento a rigidez diminui e, a baixas temperaturas, tende a aumentar, com diminuição do ângulo de fase e da parcela viscosa. O ângulo de fase é a diferença/defasagem entre o pulso de tensão e o pulso de deformação (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.4 Módulo Dinâmico

Se a carga aplicada for de baixa intensidade em comparação à tensão de ruptura do material, e repetida por longos ciclos, as misturas podem ter seu comportamento considerado elástico, apesar de não ser. Esta hipótese, uma vez admitida, possibilita a simplificação da análise das camadas por meio de soluções analíticas ou numéricas, entretanto os conceitos de

viscoelasticidade podem e devem ser aplicados no estudo do desempenho dos pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O módulo dinâmico ($|E^*|$) foi desenvolvido experimentalmente devido à importância de se analisar tal característica oriunda do ligante betuminoso. Papazian (1962) realizou um experimento de forma que aplicava, em um corpo de prova a temperaturas controladas, tensões axiais senoidais a variadas frequências, e media seus respectivos deslocamentos. Nos anos seguintes outros ensaios foram realizados com diferentes formas de carregamento e as análises indicaram que os procedimentos feitos através de tração-compressão eram mais representativos do encontrado em campo, além de observar também que as maiores diferenças entre eles se encontravam no ângulo de fase. O módulo dinâmico, além das propriedades viscoelásticas, pode determinar as elásticas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O indicador, segundo Pritz (1998), pode ser caracterizado como a relação tensão-deformação de materiais viscoelásticos e está representado pelas equações abaixo.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$E^* = E' + iE'' \quad (2)$$

$$E' = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

Nos quais:

σ_0 : magnitude da tensão aplicada;

ε_0 : magnitude da deformação;

E^* : módulo dinâmico;

E' : parte real, correspondente à parcela elástica do material;

E'' : parte imaginária, correspondente à porção viscosa do material;

δ : ângulo de fase.

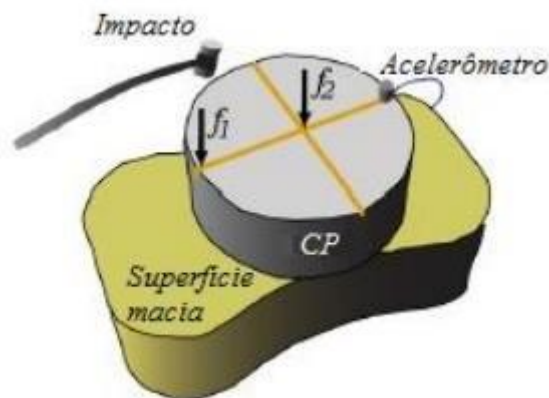
2.4.1 Determinação do Módulo Dinâmico

Este parâmetro normalmente é obtido por meio do ensaio chamado Compressão Axial Dinâmico, que se dá ao aplicar axialmente um carregamento senoidal em corpos de prova cilíndricos (AASHTO T342 (2011)). É repetido sob diferentes frequências de carregamento e temperaturas dos corpos de prova a fim de gerar a curva mestra que, utilizando o princípio da superposição, “permite que os dados coletados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência” (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Outra forma de descrever o comportamento viscoelástico linear do asfalto é o ensaio de ressonância por impacto (RI). É bastante preferível comparado ao já citado por causa da sua simplicidade, eficiência e por ser mais viável economicamente, no entanto ainda é de pouco uso no Brasil. O método RI induz uma excitação por golpe em uma amostra e mede a vibração natural dela. A metodologia do teste foi proposta com base na repetitividade e variabilidade da frequência de ressonância e valores de ângulo de fase. Inicialmente foi realizado com CPs (corpos de prova) de misturas asfálticas em formato cilíndrico (100mm de diâmetro e 150mm de altura), entretanto as amostras não eram muito representativas dos núcleos de campo. Por esse motivo Kim e Kim (2016) concluíram que amostras de disco fino se aproximam mais do real na determinação do módulo dinâmico.

2.4.1.1 Ensaio de Ressonância por Impacto

O teste de RI traduz-se na aplicação de um impulso em determinados pontos da amostra, registrado pelo acelerômetro como uma frequência de onda natural amortecida. Esta frequência compilada pelo acelerômetro é obtida através dos modos de vibração 1 e 2, modo flexural assimétrico fundamental e modo longitudinal simétrico, respectivamente. Tais vibrações são correspondentes ao impacto em dois pontos como mostra a figura 2 (f_1 e f_2).



f_1 : golpe aplicado na extremidade do CP (a 180° do acelerômetro);

f_2 : golpe aplicado no centro do CP.

Figura 2 - Esquema do ensaio de RI.

Fonte: RYDÉN (2009).

Os valores do módulo dinâmico ($|E^*|$) determinados são baseados na frequência de ressonância, obtida da curva de resposta medida no domínio de frequência. A frequência ressonante é aquela correspondente ao pico de amplitude mais alta, segundo RAO (2009), é

quando a frequência da carga externa coincide com a natural (Figura 3). Entretanto, por causa das características do material, o valor adquirido é amortecido, desta forma é necessário transformar a frequência amortecida (f_d) em natural não amortecida (f_n), através do fator de amortecimento (ζ).

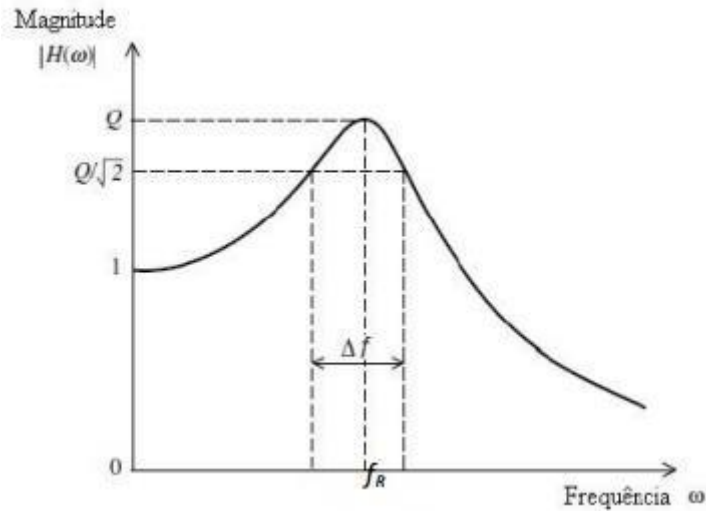


Figura 3 – Resposta da frequência a um impulso de um oscilador simples.

Fonte: COSTA (2017)

Para isto, Kweon e Kim (2006) e Rýden et al. (2001) conseguiram relacionar as duas frequências utilizando o método de largura de banda. Costa (2017) observou que este método apresenta um baixo coeficiente de variação. Segundo Soletto e França (2006), a largura de banda do sistema é a diferença entre os pontos de meia potência, ou seja, em $\frac{1}{\sqrt{2}}$. A potência absorvida pelo amortecedor é proporcional ao quadrado da amplitude, como mostra a equação 5:

$$\Delta U = \pi \cdot c \cdot f \cdot Q^2 \quad (5)$$

Em que:

ΔU = potência absorvida pelo amortecedor;

c = coeficiente de amortecimento;

f = frequência do sistema;

Q = máxima amplitude do sistema.

Aplicando os pontos de meia potência em uma vibração excitada harmonicamente, o amortecimento será:

$$\zeta = \frac{\Delta f}{2f_R} \quad (6)$$

Em que:

ζ = fator de amortecimento;

Δf = largura de banda (0,707 do pico máximo);

f_R = frequência natural amortecida máxima.

A frequência natural não amortecida (f_n), que é a utilizada na obtenção dos resultados, será determinada com o uso do amortecimento, pela equação 7 (RAO, 2009):

$$f_d = \sqrt{1 - \zeta^2} * f_n \quad (7)$$

Com este método é possível determinar o ângulo de fase, módulo dinâmico e construir uma curva mestra, apesar de ser determinado apenas um valor de frequência natural, ou seja, não existir a sobreposição de pontos. Conforme Kweon e Kim (2006), mesmo sem a sobreposição, esse deslocamento horizontal é plausível a partir do *shift fator* (fator de deslocamento).

De acordo com as orientações de Kim e Kim (2016), adaptado da norma ASTM E1876 (2009), para f_1 e f_2 , explicadas posteriormente, determina-se um valor de módulo de armazenamento pela equação 8:

$$E_{S_i} = \frac{48 \cdot \rho \cdot f_{n_i}^2 \cdot R^4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2)}{K_i^2 \cdot h^2} \quad (8)$$

No qual:

E_{S_i} = módulo de armazenamento;

ρ = massa específica do disco (kg/m³);

f_n = frequência ressonante natural (Hz);

R = raio do corpo de prova (m);

ν = coeficiente de Poisson, tabelado pela ASTM E1876 (2009) a partir das relações entre $\frac{f_{d2}}{f_{d1}}$ e $\frac{h}{r}$;

K_i = fator geométrico, tabelado pela ASTM E1876 (2009) em função de $\frac{h}{r}$ e ν ;

h = espessura do corpo de prova (m).

O índice i representa os modos de vibração 1 e 2, por f_1 e f_2 respectivamente.

Para converter o módulo de armazenamento em módulo dinâmico é necessário computar o ângulo de fase:

$$\phi = \tan^{-1}(2\zeta) \quad (9)$$

Posteriormente à conversão, é possível calcular o módulo dinâmico como a média dos módulos dinâmicos para os modos de vibração 1 e 2:

$$|E^*|_i = \frac{E_{S_i}}{\cos(\phi_i)} \quad (10)$$

$$|E^*| = \frac{|E^*|_1 + |E^*|_2}{2} \quad (11)$$

Como obter esses valores será explicado mais adiante, em materiais e métodos. Quando comparado ao ensaio mecânico convencional para obtenção de E^* , o ensaio de ressonância por impacto apresenta faixa de temperatura inferior, entretanto Rydén (2009) conseguiu obter valores até uma temperatura de 54°C. Este trabalho pretende também caracterizar o material a temperaturas superiores a esta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo é a continuação de um trabalho realizado com uma parceria entre o Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/Petrobras), localizado no Rio de Janeiro, e o Laboratório de Topografia e Transportes (LTT) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS). O CENPES dosou as misturas, confeccionou os corpos de prova e realizou o ensaio de módulo dinâmico pelo método convencional: o de compressão axial dinâmico, através da norma AASHTO T 342-11. Costa (2017) realizou o ensaio de ressonância por impacto em conformidade com a ASTM E1876 (2009), determinou a curva mestra de módulo dinâmico de ambos os métodos e analisou os resultados, comparando-os. Este trabalho pretende caracterizar a curva mestra na região de baixa frequência, com temperaturas a partir de 20°C. Na Figura 4 se encontra o fluxograma estabelecido para a realização deste trabalho.

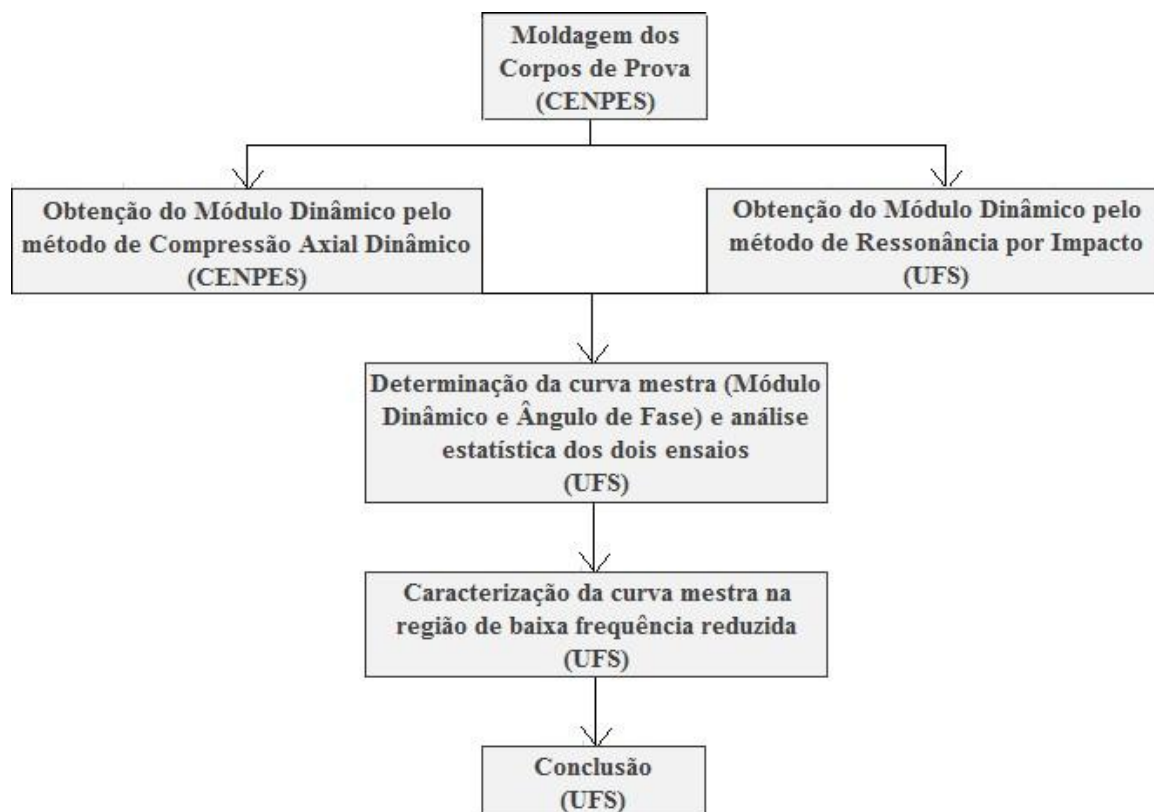


Figura 4 - Fluxograma de Iniciação Científica

3.1 Materiais

As seis amostras utilizadas foram dosadas pelo CENPES por meio da metodologia *Superpave* ou Marshall, oriundas de diferentes estados: Rio de Janeiro, Paraná, Ceará e Pernambuco. Tais corpos de prova foram serrados e retificados por Costa (2017) em cinco discos, de

maneira que, para realização dos ensaios desta pesquisa, foram escolhidos os discos que estavam mais bem conservados.

Tabela 3: Origem e composição das amostras utilizadas.

	Identificação	Tipo de Ligante (CAP)	Dosagem	Agregados	Procedência
CP 02	A-RJ-3045	30/45	Superpave	Sepetiba	RJ
CP 04	A-CE-5070	50/70	Superpave	Sítio Maninho	CE
CP 14	A-PE-6085	60/85	Superpave	Paraíso	PE
CP 23	A-PR-6085	60/85	Marshall	Ped Catedral	PR
CP 27	C-RJ-5070	50/70	Superpave	Sepetiba	RJ
CP 28	A-PR-5070	50/70	Marshall	J Malucelli	PR

Costa (2017) realizou os ensaios de RI para misturas asfálticas com três tipos de cimentos asfálticos, o CAP 30/45, o CAP 50/70 e o CAP 60/85, seguindo as orientações da ASTM E1876 (2009). Construíram-se as curvas mestras, porém notou-se que elas apresentavam uma limitação na região de baixa frequência, a partir de 55°C. Nesta pesquisa o ensaio foi executado a temperaturas de 20°C até no máximo 65°C, a fim de caracterizar melhor as curvas e poder determinar os valores de módulo dinâmico e de ângulo de fase em frequências reduzidas inferiores a 1 Hz.

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaio de Compressão Axial Dinâmico (CAD)

Realizou-se em concordância com as recomendações da norma norte americana AASHTO T 342-11. Os corpos de prova apresentavam formato cilíndrico, com 150 mm de altura por 100 mm de diâmetro. Para determinada faixa de temperatura e frequências de cargas obtinham-se valores de módulo dinâmico e ângulo de fase, por meio da aplicação axial senoidal de um carregamento. Este ensaio foi realizado pelo CENPES.

Colocou-se o corpo de prova numa câmara de resfriamento, onde foi submetido às temperaturas de 4, 20 e 40°C e, para cada uma das condições, sofreu aplicação de carga em frequências de 25, 10, 5, 1, 0,5, 0,1 Hz, nesta ordem decrescente. Utilizou-se uma prensa servo-hidráulica MTS modelo 810 para a imposição do carregamento e dois extensômetros para a medida da deformação, fixados a 180° com o auxílio de elásticos (Costa, 2017).

3.2.2 Ensaio de Ressonância por Impacto (RI)

Pelo fato de não existirem normas específicas para a execução do teste e determinação do módulo dinâmico de misturas asfálticas, utilizaram-se neste trabalho as diretrizes da ASTM E1876 (2009) e ASTM C215 (2008), além dos modelos desenvolvidos por Kweon e Kim (2006), Rýden (2009), Kim e Kim (2016) e Costa (2017).

O ensaio consiste em aplicar um impulso para registrar a frequência natural do material com o uso do acelerômetro. A norma ASTM E1876 (2009) estabelece, para CPs em forma de discos finos ($L/S > 0,25$), como obter o coeficiente de Poisson através da relação entre duas frequências naturais, obtidas nos modos de vibração torsional e flexural. Na primeira vibração, as deformações na seção transversal do CP são normais ao plano e simétricas em torno de dois diâmetros ortogonais ao plano do disco, produzindo uma torção, como mostra a figura 5. Para reproduzi-la, colocou-se o acelerômetro na extremidade do disco, a 45° de um ponto de apoio e aplicou-se o impulso a 180° do acelerômetro.

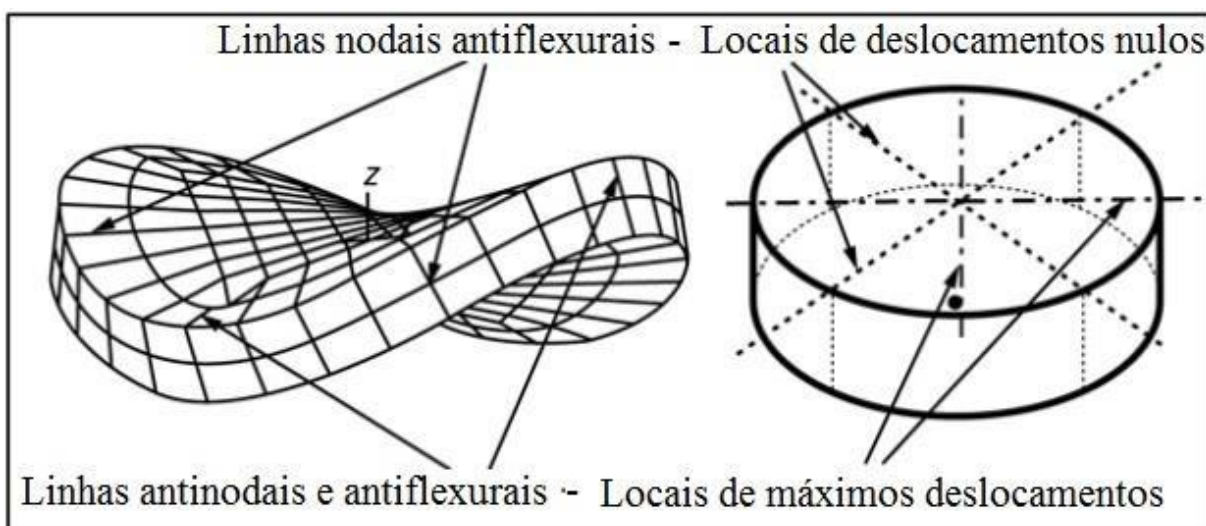


Figura 5 – Diagrama de deslocamento do CP em forma de disco fino na primeira vibração natural.

Fonte traduzida: ASTM E1876 (2009)

Na segunda vibração, as deformações na seção transversal são normais ao plano e uniformes ao longo de uma distância radial a partir do centro e em torno de todo o CP, como mostra a figura 6. Para reproduzi-la, colocou-se o acelerômetro na extremidade do disco e aplicou-se o impulso no centro do mesmo.

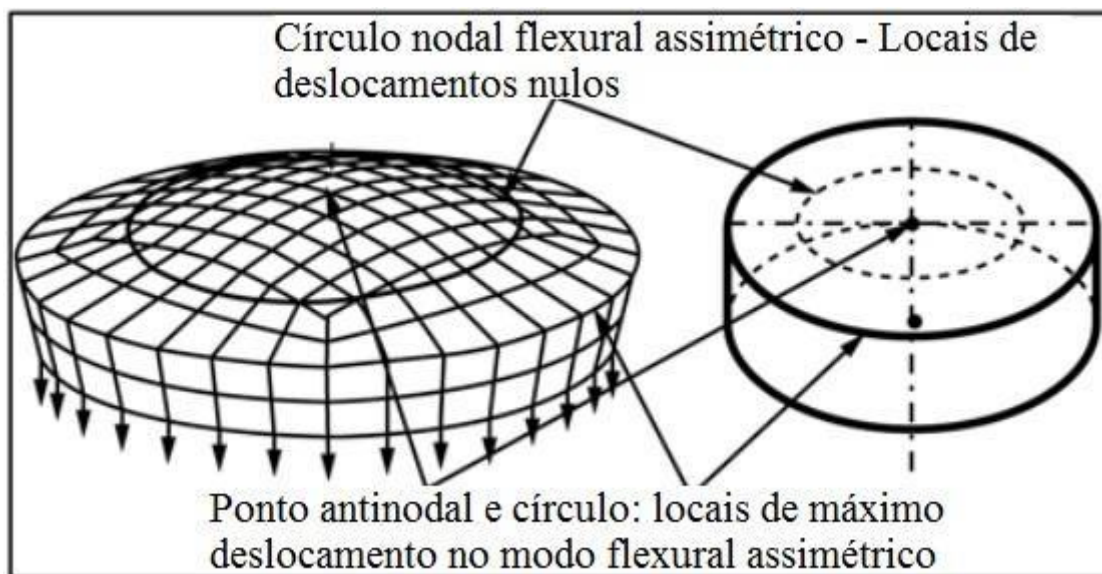


Figura 6 – Diagrama de deslocamento do CP em forma de disco fino na segunda vibração natural.

Fonte traduzida: ASTM E1876 (2009)

Calculou-se o diâmetro do círculo nodal, local onde as deformações são nulas, como 0,681 do diâmetro do CP. Apoiou-o em quatro pontos a 90° entre si, como mostra a figura x, e isso favoreceu a obtenção da frequência no modo desejado, além de minimizar as interferências (ASTM E1876, 2009).

Após realizar o ensaio de RI nas temperaturas de 20, 30, 40, 50, 55, 60 e 65°C para cada corpo de prova, realizaram-se os cálculos. É importante salientar que o CP 28, ao atingir a temperatura de 50°C, se rompeu e além deste inconveniente, os CPs 04 e 27 não apresentaram bons resultados de frequência para a temperatura de 65°C e os CPs 14 e 23 para as temperaturas de 60 e 65°C.

Posteriormente ao registro das frequências tornou-se necessário transformar a frequência natural amortecida em não amortecida, já que a norma não considera o amortecimento causado pelo material viscoelástico. Essa conversão foi possível ao calcular o fator de amortecimento pela equação (6), com a obtenção das frequências correspondentes à largura de banda e a frequência natural amortecida máxima, através do software *winFTS*.

Calculadas as frequências naturais não amortecidas, com o auxílio da norma ASTM E1876 (2009), por meio da relação entre frequências e $\frac{h}{r}$ conseguiram-se os valores para o coeficiente de Poisson (ν). Com este e novamente a relação $\frac{h}{r}$ conseguiram-se os valores para os coeficientes geométricos K_1 e K_2 , fazendo interpolação quando necessário. Por fim, computou-se o módulo de armazenamento pela equação (8), converteu-o em módulo dinâmico com o uso do ângulo de fase, para os dois modos de vibração, e obteve-se a média desses. Os valores obtidos serão apresentados na seção dos Resultados e Discussões.

Para elaborar a curva mestra define-se uma temperatura de referência (igual a 20°C nesta pesquisa), visto que no princípio de Superposição Tempo-Temperatura ambas causam efeitos semelhantes em relação ao módulo dinâmico sobre materiais viscoelásticos. Esta temperatura de referência é obtida do fator de deslocamento (*shift factor*), que vai deslocar horizontalmente as curvas de diferentes temperaturas, unificando-as. Além disso, na curva mestra, o módulo dinâmico deve estar em função da frequência reduzida, obtida também do fator de deslocamento para cada metodologia. O *shift factor* foi elaborado manualmente de maneira a construir uma curva contínua.

3.2.2.1 Equipamento utilizado

A execução deste procedimento se deu através do *Nondestructive Evaluation 360 Platform* (NDE 360), equipamento de fácil utilização desenvolvido pela *Oslon Instruments Inc.* Faz parte dele um pequeno martelo, que serve para aplicar o impacto, um acelerômetro, que capta a resposta da amostra ao sofrer o impulso, e um sistema de aquisição de dados (Figura 7). Este processador, além dos valores necessários para realizar os cálculos, também fornece (graficamente) a vibração medida pelo acelerômetro. A extração das representações e dados foram feitas utilizando o software *winFITS*, fornecido pela *Oslon Instruments Inc.*

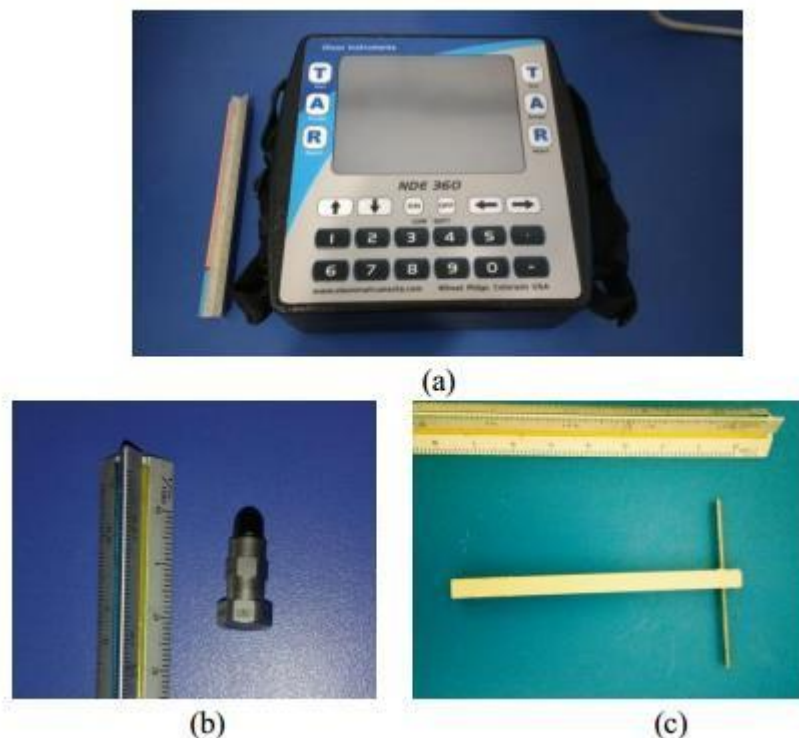


Figura 7 – (a) NDE 360 Plataforma; (b) Acelerômetro; (c) Martelo.

Fonte: COSTA (2017)

Mediante uma câmara de resfriamento (Figura 8) pôde-se manter os discos na temperatura desejada de ensaio e, assim, realizá-lo. Atentou-se para a posição dos discos nos

apoios (Figura 9), de modo que eles estivessem centralizados e bem apoiados nos quatro pinos.



Figura 8 – (a) Câmara com pódio e CPs.

Fonte: COSTA (2017)



Figura 9 – (a) Apoios usados para realização dos ensaios.

Fonte: COSTA (2017)

3.2.3 Comparação entre as Curvas Mestras de cada ensaio

Para unificar as temperaturas de 4°, 20° e 40°C do ensaio de CAD, gerando a curva mestra, Costa (2017) obteve manualmente valores de *shift factor*. A partir destes e com o uso do software STATISTICA 7, foi possível modelar a função polinomial quadrática que ajustava os resultados do fator de deslocamento para cada CP.

$$\log SF = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 \quad (12)$$

T é a temperatura em °C.

Para o ensaio de RI, com as constantes α_1 , α_2 e α_3 definidas para cada CP pelo ensaio mecânico convencional e aplicando as respectivas temperaturas do ensaio de RI, os valores de *shift factor* foram calculados. Para elaborar a curva mestra, novamente pelo STATISTICA 7, modelou-se uma função sigmoidal (equação 13), com os valores da frequência reduzida (multiplicação da frequência natural não-amortecida pelo fator de deslocamento) e dos módulos dinâmicos máximo e mínimo dos dois modos de vibração.

$$|E^*| = \frac{E_{MAX} + E_{MIN}}{(1 + e^{(b_1 + b_2 \log fr)})} \quad (13)$$

A relação entre as curvas, os fatores de deslocamento, as constantes e os modelos gerados para cada metodologia serão apresentados na seção Resultados e Discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de facilitar a compreensão do trabalho, os exemplos e cálculos desta seção apresentarão apenas os resultados gerados para o CP 02, referente à mistura A-RJ-3045. Os demais resultados, correspondentes aos outros cinco corpos de provas, serão apresentados apenas na comparação entre as curvas.

4.1 Curva Mestra do Módulo Dinâmico para o Ensaio de Compressão Axial Dinâmico (CAD)

Por meio deste método calcularam-se os valores de módulo dinâmico e ângulo de fase de acordo com a frequência de carregamento aplicada para diferentes temperaturas (Tabela 4). Os dados a seguir foram enviados pelo CENPES.

Tabela 4: Resultados do ensaio CAD para o CP 02.

Freq (Hz)	Temp (°C)	Carga, N	Def (Microns)	E (MPa)	Ang de Fase (graus)
25	4	12604,79	6,3820E-05	25097,00	5,038
10	4	11720,23	6,4082E-05	23240,24	7,072
5	4	11026,77	6,3707E-05	21994,02	7,789
1	4	8872,81	6,0019E-05	18822,74	9,788
0,5	4	8225,28	6,0798E-05	17225,62	10,705
0,1	4	6940,93	6,4448E-05	13712,47	13,151
25	20	6119,02	6,4162E-05	12118,48	14,177
10	20	5157,02	6,4691E-05	10129,76	17,427
5	20	4457,73	6,3914E-05	8862,52	18,981
1	20	3122,72	6,2361E-05	6375,72	21,834
0,5	20	2730,26	6,6229E-05	5248,83	23,806
0,1	20	1689,74	6,6216E-05	3249,16	28,035
25	40	1228,21	6,0244E-05	2590,62	32,325
10	40	839,26	6,3416E-05	1681,66	34,671
5	40	587,29	6,4133E-05	1163,62	36,633
1	40	284,87	6,5536E-05	553,44	34,286
0,5	40	203,55	6,6740E-05	388,32	33,811
0,1	40	108,00	6,9212E-05	198,68	29,991

Na concepção da curva mestra foi necessário converter a frequência de carregamento em frequência reduzida através do fator de deslocamento. Como a temperatura de referência escolhida foi de 20°C, o valor de *shift factor* (SF) para a mesma foi unitário, e para as condições de 4° e 40°C, com o intuito de gerar uma curva contínua, foram adotados valores constantes de forma manual (Tabela 5).

Tabela 5: *Shift factor* (SF), frequência reduzida e LOG (SF) para o CP 02.

Temp, C	Freq, Hz	E, MPa	SF	Freduzida	LOG (SF)
4	25	25096,998	600	15000	4,400
4	10	23240,245	600	6000	4,366
4	5	21994,019	600	3000	4,342
4	1	18822,740	600	600	4,275
4	0,5	17225,616	600	300	4,236
4	0,1	13712,469	600	60	4,137
20	25	12118,480	1	25	4,083
20	10	10129,762	1	10	4,006
20	5	8862,517	1	5	3,948
20	1	6375,716	1	1	3,805
20	0,5	5248,829	1	0,5	3,720
20	0,1	3249,157	1	0,1	3,512
40	25	2590,623	0,0025	0,0625	3,413
40	10	1681,658	0,0025	0,025	3,226
40	5	1163,622	0,0025	0,0125	3,066
40	1	553,439	0,0025	0,0025	2,743
40	0,5	388,316	0,0025	0,00125	2,589
40	0,1	198,676	0,0025	0,00025	2,298

Com os valores de LOG (SF) e a temperatura, foi possível ajustar um modelo polinomial do segundo grau pelo software STATISTICA 7 (Figura 10). Os coeficientes do modelo são apresentados na Tabela 6.

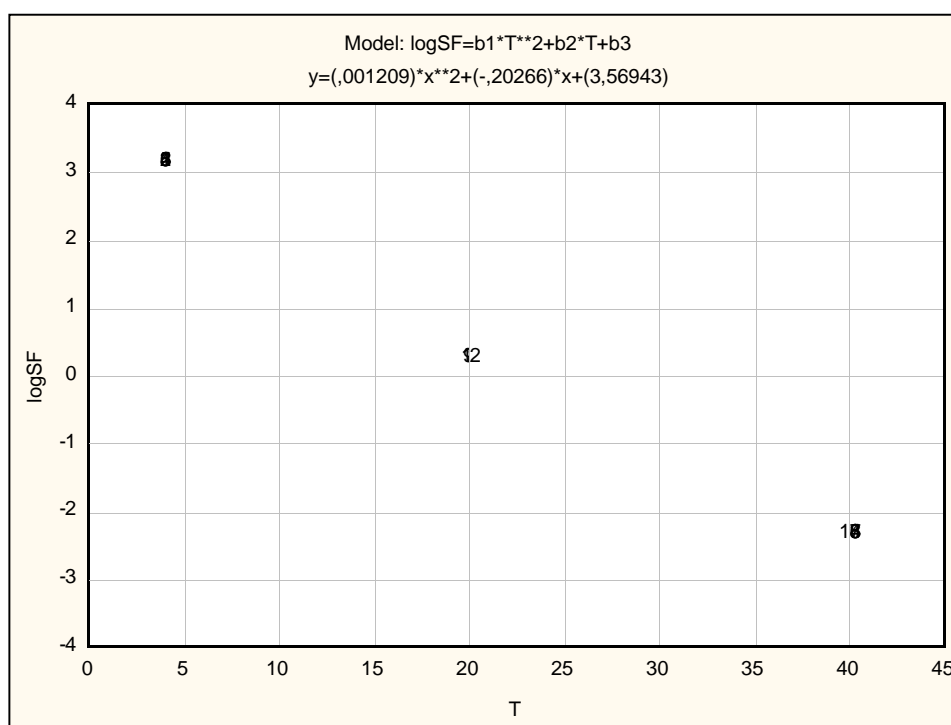


Figura 10: Modelo da equação polinomial do *shift factor* para o CP 02.

Tabela 6: Coeficientes do modelo para o CP 02.

	Alfa 1	Alfa 2	Alfa 3
CP 02	0,001209	-0,20266	3,56943
CP 04	0,001565	-0,21217	3,63657
CP 14	0,001276	-0,19644	3,41858
CP 23	0,001006	-0,18314	3,26055
CP 27	0,000752	-0,16792	3,05759
CP 28	0,001578	-0,21569	3,68261

Assim, ao unificar a temperatura de referência de 20°C, construiu-se a curva mestra do módulo dinâmico em função da frequência reduzida, na escala logarítmica.

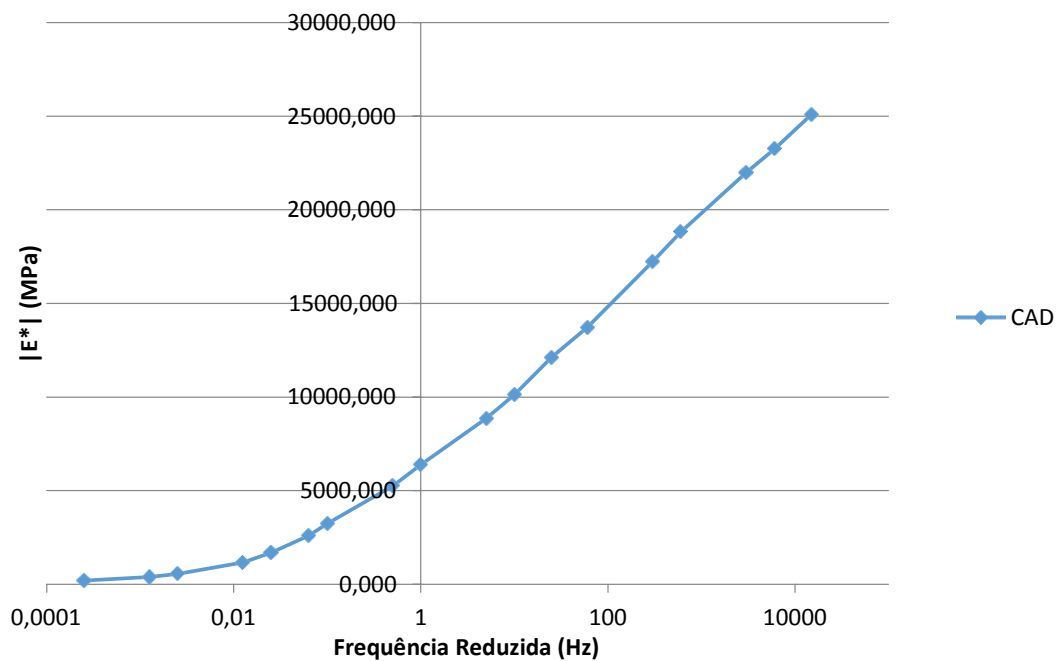


Figura 11: Curva Mestra de Módulo Dinâmico do CP 02 pelo ensaio CAD.

Por esta curva pode-se observar a relação diretamente proporcional entre o módulo dinâmico e a frequência, pois quando se aumenta a frequência, cresce o módulo dinâmico. Esta relação confirma o desempenho característico do material viscoelástico, discutido na seção 2.3. Além disso, exibe um comportamento sinuoso, como era esperado, e sobrepõe-se em alguns pontos, pelo princípio de superposição tempo-temperatura. De maneira análoga, as curvas mestras para os outros corpos de prova foram construídas e são apresentadas no comparativo entre os métodos de ensaio.

4.2 Curva Mestra do Módulo Dinâmico para o Ensaio de Ressonância por Impacto (RI)

4.2.1 Cálculo do Módulo Dinâmico

Os processos de cálculo adotados para a obtenção de módulo dinâmico para o CP 02 estão apresentados nas tabelas 7 a 10. Na tabela 7 encontra-se a relação f_2/f_1 para cada temperatura que o CP 02 foi submetido, necessárias para a obtenção do coeficiente de Poisson pela norma ASTM E1876, além dos coeficientes geométricos K1 e K2. Na tabela 8 estão os valores da largura de banda, adquiridos pelo software *winFTS* (f_d , f_0 e f), necessários para o cálculo do fator de amortecimento (ζ). Na tabela 9 encontram-se os ângulos de fase, calculados pelo fator de amortecimento. Na tabela 10, por fim, a frequência natural e os módulos de armazenamento e dinâmico para cada temperatura.

Tabela 7: Coeficientes de Poisson e Geométricos, pela norma ASTM E1876 (2009) e relação $\frac{h}{r} = 0,5$.

Temp	f_2/f_1	ν	K1	K2
20	1,568	0,28	4,449	6,948
30	1,632	0,33	4,296	6,971
40	1,750	0,41	4,036	6,993
50	1,900	0,52	3,648	7,014
55	1,526	0,25	4,535	6,931
60	1,714	0,39	4,103	6,989
65	1,636	0,34	4,265	6,975

Tabela 8: Fator de amortecimento pelo Método da Largura de Banda.

Temp	Modo 1-1					Modo 1-2				
	f_d	f_0	f	DeltaF	ζ	f_d	f_0	f	DeltaF	ζ
20	6138,4	5852,2	6334,8	482,6	0,039	9626,1	9276,0	9898,2	622,2	0,032
30	5301,3	4751,1	5599,5	848,4	0,080	8649,6	7975,1	9106,3	1131,2	0,065
40	3348,2	2997,7	3733	735,3	0,110	5859,4	5203,6	6448	1244,4	0,106
50	2790,2	2432,1	3110,9	678,8	0,122	5301,3	4694,6	5838,9	1144,3	0,108
55	2650,7	1508,3	3197,6	1689,3	0,319	4045,8	3110,9	4468,3	1357,4	0,168
60	1953,1	1300,9	2658,4	1357,5	0,348	3348,2	2714,9	4694,6	1979,7	0,296
65	1534,6	791,86	2092,8	1300,94	0,424	2511,2	2262,4	2884,6	622,2	0,124

Em que,

f_d é a frequência natural amortecida;

f_0 é a frequência da largura de meia potência anterior à de pico;

f é a frequência da largura de meia potência posterior à de pico;

ζ é o fator de amortecimento.

Tabela 9: Ângulos de fase pelos modos de vibração 1 e 2(em graus).

Temp	Φ_1	Φ_2
20	4,50	3,70
30	9,09	7,45
40	12,39	11,99
50	13,67	12,18
55	32,51	18,55
60	34,80	30,59
65	40,29	13,92

Tabela 10: Módulo de Armazenamento (em MPa) e Módulo Dinâmico (em MPa) para o CP 02.

Temp	Modo 1-1			Modo 1-2			E* med
	fn	Es1	E*1	fn	Es2	E*2	
20	6143,15	19751,01	19811,96	9631,13	19901,14	19942,67	19877,32
30	5318,35	15355,05	15550,44	8668,15	15492,42	15624,34	15587,39
40	3368,57	6502,91	6657,88	5892,72	6627,97	6775,79	6716,84
50	2811,07	4879,26	5021,57	5332,45	4751,00	4860,42	4941,00
55	2796,47	4014,67	4760,65	4103,96	3700,59	3903,31	4331,98
60	2082,93	2462,93	2999,42	3504,87	2403,41	2792,10	2895,76
65	1694,34	1577,74	2068,38	2530,69	1316,07	1355,87	1712,12

Em que,

fn é a frequência natural não-amortecida;

Es é o módulo de armazenamento;

|E*| é o módulo dinâmico.

4.2.2 Construção da Curva Mestra

Para cada corpo de prova, como foi mostrado anteriormente, obtiveram-se equações polinomiais de *shift factor* do ensaio de CAD (Tabela 6) que, por sua vez, foram utilizadas na obtenção dos fatores de deslocamento para o método RI.

Através dos modelos e aplicando as temperaturas de 20°, 30°, 40°, 50°, 55°, 60° e 65°C na função polinomial, foram calculados os *shift factors*. Com os respectivos fatores de deslocamento, foi possível computar a frequência reduzida, multiplicando seus resultados pela frequência natural não amortecida de cada modo de vibração (Tabela 11).

Tabela 11: *Shift factor* (SF), frequência natural, frequência reduzida e LOG da frequência reduzida para o CP 02.

CP 02							
Temp	SF	fn 1-1	fn 1-2	FR 1-1	FR 1-2	logFR 1-1	logFR 1-2
20	0,9996086	6143,148	9631,131	6140,744	9627,362	3,78822	3,98351
30	0,0378207	5318,354	8668,152	201,144	327,836	2,30351	2,51566
40	0,0024971	3368,569	5892,717	8,412	14,715	0,92488	1,16775
50	0,0002877	2811,074	5332,447	0,809	1,534	-0,09220	0,18586
55	0,0001203	2796,475	4103,958	0,336	0,494	-0,47303	-0,30644
60	0,0000578	2082,927	3504,866	0,120	0,203	-0,91910	-0,69310
65	0,0000320	1694,336	2530,695	0,054	0,081	-1,26645	-1,09221

Com a finalidade de construir a curva mestra, completando-a na região de baixa frequência (de 1Hz a 0,001Hz), utilizou-se a função sigmoideal (equação 13) para ajustar os modelos de módulo dinâmico da Tabela 12.

Tabela 12: Coeficientes da função sigmoidal de E^* para os CPs.

	$E_{MÁX} + E_{MÍN}$	b1	b2
CP 02	21298,539	1,17154	-0,91883
CP 04	21847,239	1,71803	-1,0375
CP 14	19233,534	1,53703	-0,78613
CP 23	20184,63	1,33237	-0,75645
CP 27	20163,617	1,22484	-0,7764
CP 28	19921,712	1,84582	-0,74228

A partir destes modelos, calculou-se então o módulo dinâmico para cada modo de vibração, utilizando a frequência reduzida nas respectivas temperaturas (Tabela 13).

Tabela 13: Módulo dinâmico, frequência reduzida e módulo dinâmico obtido pelo modelo do CP 02.

$ E^* $	FR	logFR	$ E^* _{sig}$
19811,957	6140,744	3,788221	19373,9
15550,438	201,1441	2,303507	15337,22
6657,8806	8,41154	0,924875	8950,766
5021,5725	0,808728	-0,0922	4720,17
4760,6501	0,336485	-0,47303	3559,411
2999,4182	0,120477	-0,9191	2503,213
2068,3769	0,054145	-1,26645	1879,603
19942,673	9627,362	3,983507	19665,81
15624,342	327,8359	2,515657	16137,16
6775,7929	14,7145	1,167746	10124,79
4860,4224	1,53411	0,185857	5724,838
3903,3147	0,493808	-0,30644	4036,577
2792,1001	0,202722	-0,6931	2999,56
1355,8693	0,080871	-1,09221	2172,658
-	1	0	5038,739
-	0,1	-1	2343,613
-	0,01	-2	1001,286
-	0,001	-3	411,1148

Em que,

$|E^*|$ é o módulo dinâmico para os modos de vibração 1 e 2;

FR é a frequência reduzida para os modos de vibração 1 e 2;

logFR é o logaritmo da frequência reduzida;

$|E^*|_{sig}$ é o módulo dinâmico pela função sigmoidal.

Por fim, baseado nos dados da tabela 13, com módulo dinâmico em função da frequência reduzida, ajustou-se a curva mestra em escala logarítmica (Figura 12).

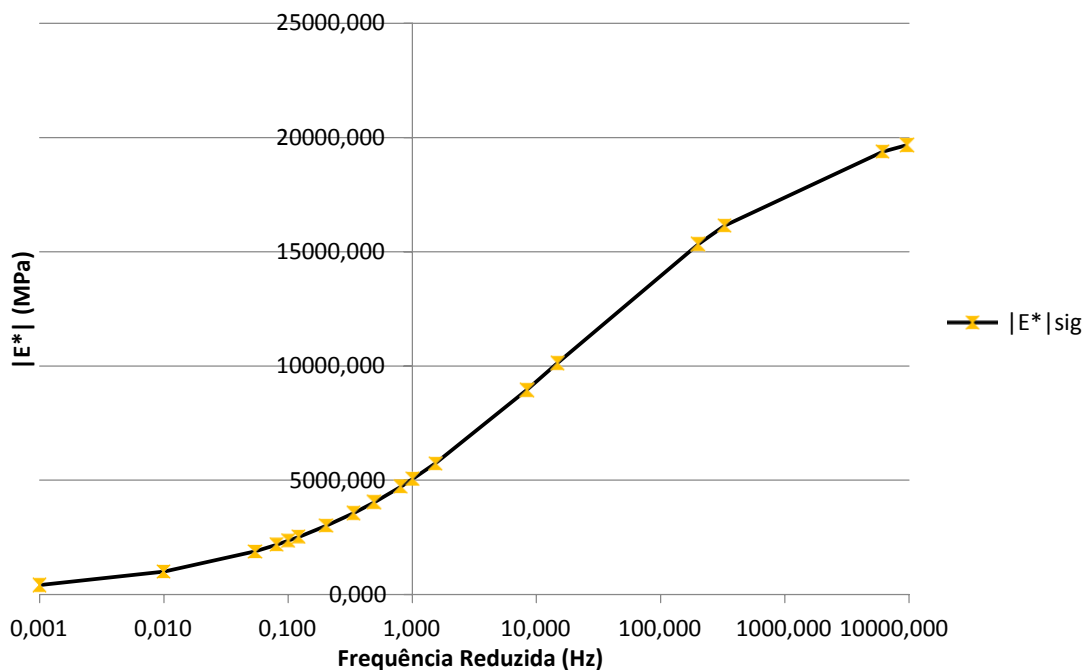


Figura 12: Curva Mestra de Módulo Dinâmico (função sigmoideal) do CP 02.

Como esperava-se, a curva teve seu comportamento semelhante à do ensaio de compressão axial dinâmico: módulo dinâmico e frequência diretamente proporcionais, além do seu comportamento sinuoso. De maneira análoga, as curvas para os outros corpos de prova foram construídas e são mostradas no comparativo entre as curvas mestras de cada ensaio.

4.3 Comparativo entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do ensaio de Compressão Axial Dinâmico e de Ressonância por Impacto

Como pôde ser visto ao longo desta seção de resultados e discussões, houve a necessidade de transformar tanto a frequência de carregamento (ensaio CAD) quanto a frequência natural (ensaio RI) em frequência reduzida. A comparação entre os métodos de ensaio só é possível por causa dessa conversão, já que a frequência natural é muito superior à de carregamento. Por este motivo ajustou-se em um único gráfico as duas curvas, o que facilitou a percepção das similaridades (Figura 13).

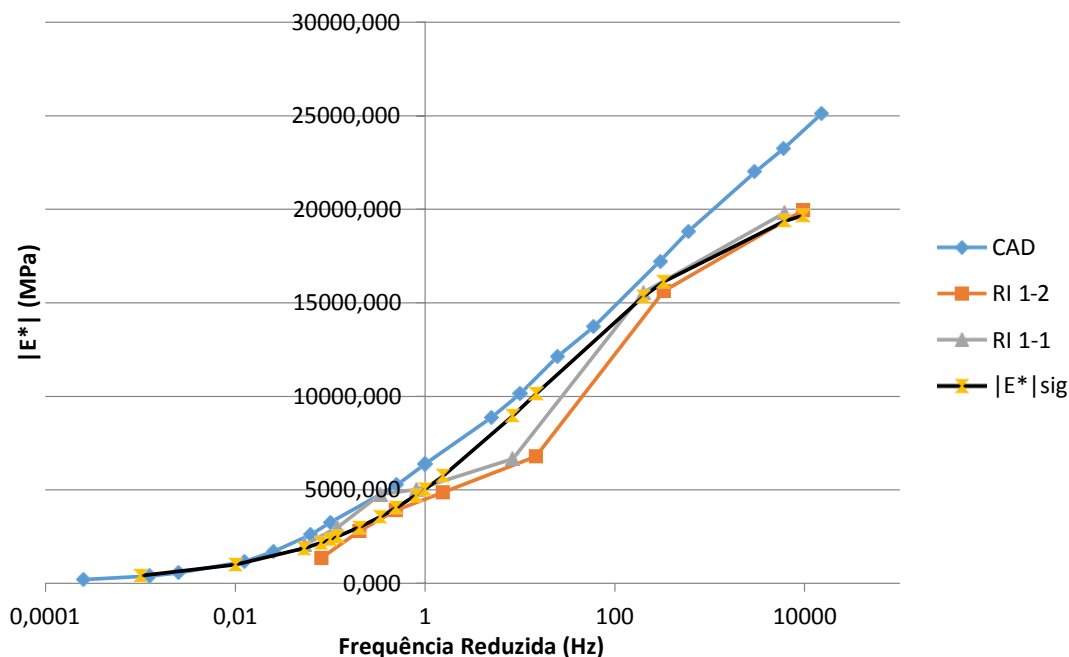


Figura 13: Comparação entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do CP 02.

Na figura 13 são apresentadas a curva mestra para o ensaio de Compressão Axial Dinâmico (CAD), as curvas de módulos dinâmicos resultantes do ensaio de Ressonância por Impacto (RI) para os modos de vibração 1 e 2, respectivamente, e a curva mestra para o ensaio de RI dos dois modos ajustada pela função sigmoidal ($|E^*|_{sig}$).

Observam-se as semelhanças no desempenho das curvas, que se mostram muito próximas e com comportamentos muito parecidos nas demais misturas asfálticas estudadas (Figuras 14 a 18).

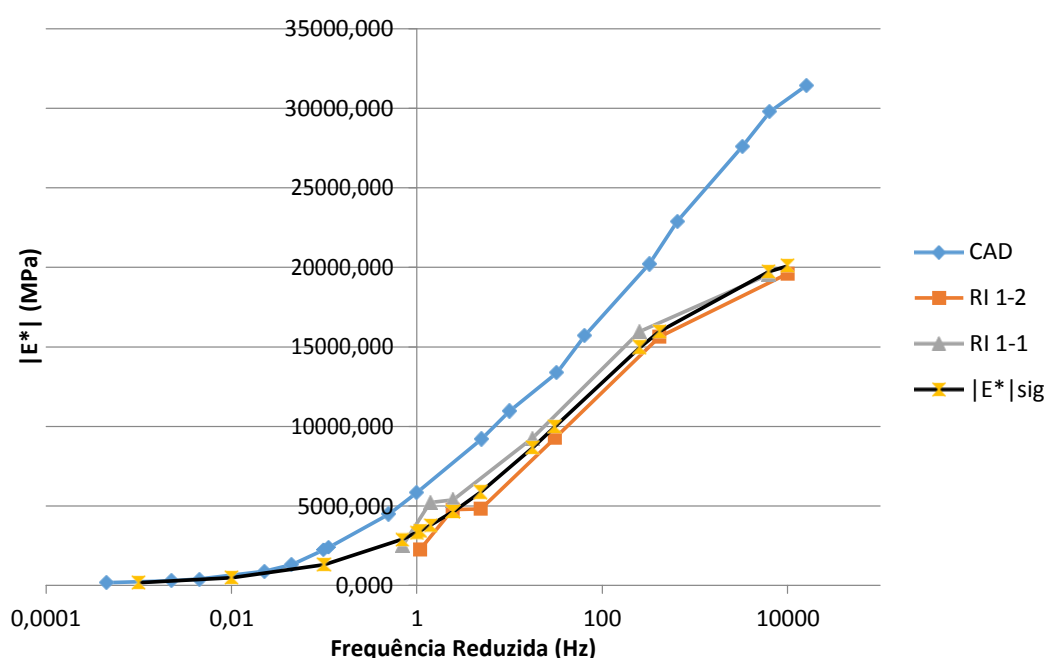


Figura 14: Comparação entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do CP 04.

Para o CP 04 (Figura 14), nota-se a curva do RI traduzindo um comportamento menos rígido que àquela obtida a partir do ensaio de CAD, mas ambas com mesma inclinação.

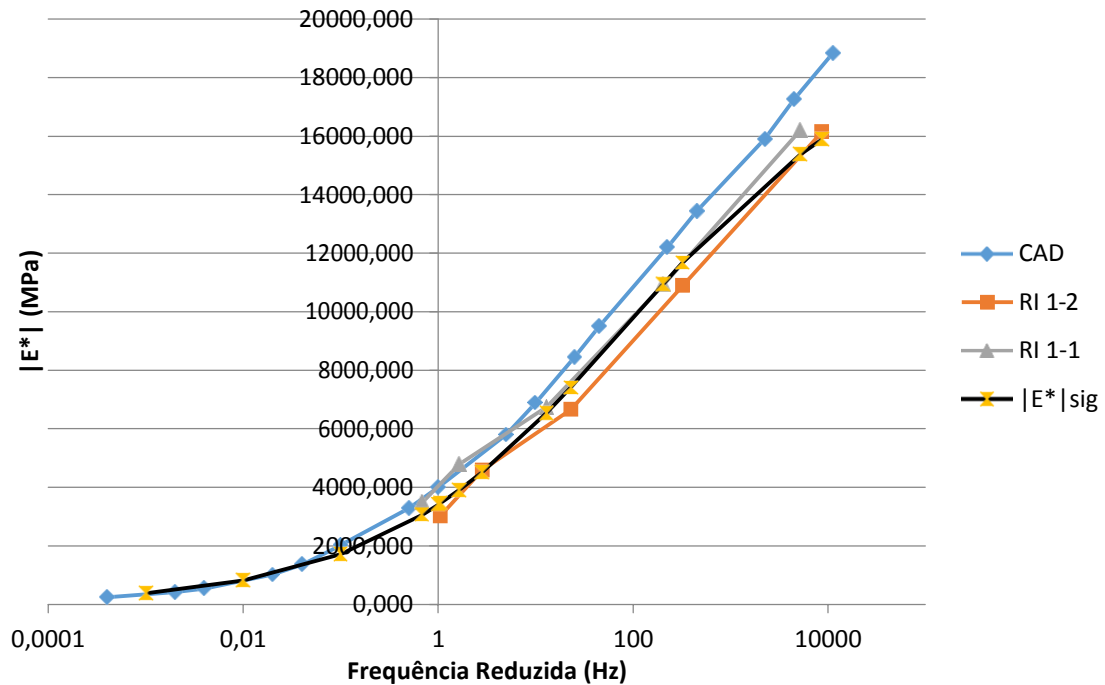


Figura 15: Comparação entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do CP 14.

Para o CP 14 (Figura 15) as curvas comportaram-se de maneira muito similar, com valores próximos, e na região de baixa frequência sobrepuseram-se em alguns pontos.

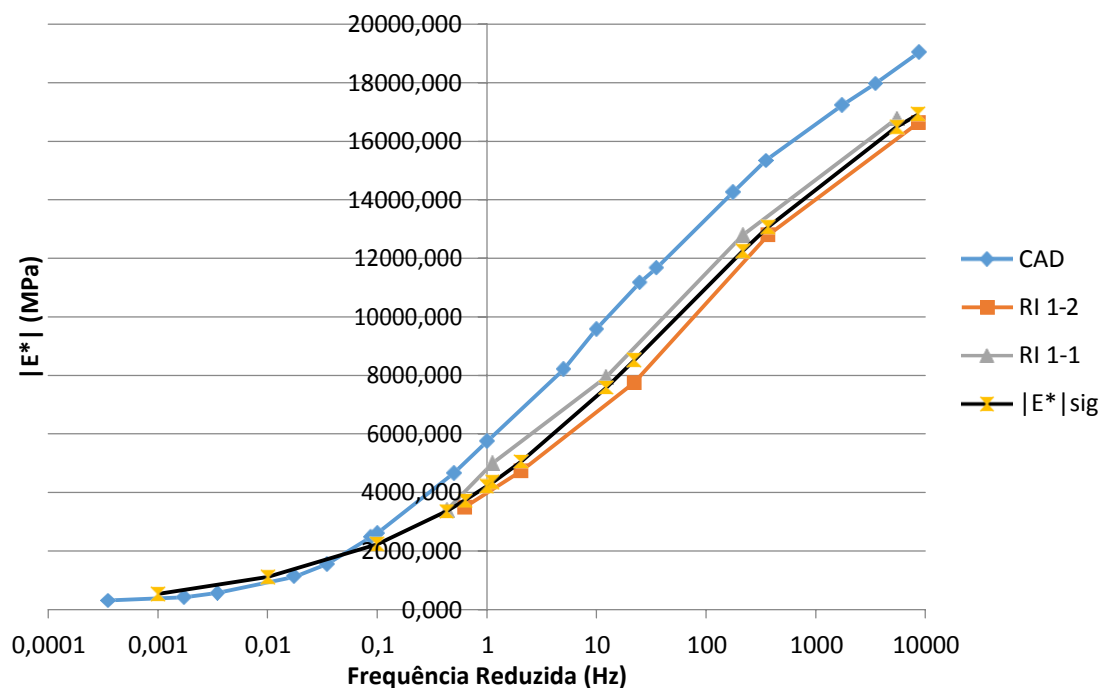


Figura 16: Comparação entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do CP 23.

Semelhante ao CP 04, no ensaio de RI, a curva do CP 23 (Figura 16) traduziu menor rigidez que a do ensaio de CAD, com módulo dinâmico mais baixo em uma mesma frequência reduzida, e inclinação também diferente.

O CP 27 apresentou a curva mestra do ensaio de RI mais distinta quando comparada à obtida pelo ensaio de CAD (Figura 17). Acredita-se que isto decorreu possivelmente devido o corpo de prova estar degradado, já que ele foi submetido a vários ensaios com ciclos de aquecimento anteriormente, quando as deformações permanentes poderiam acontecer devido à parcela viscosa da mistura asfáltica. De forma análoga, isso também aconteceu com o CP 28 (Figura 18), que se rompeu ao ser submetido à temperatura de 50°C.

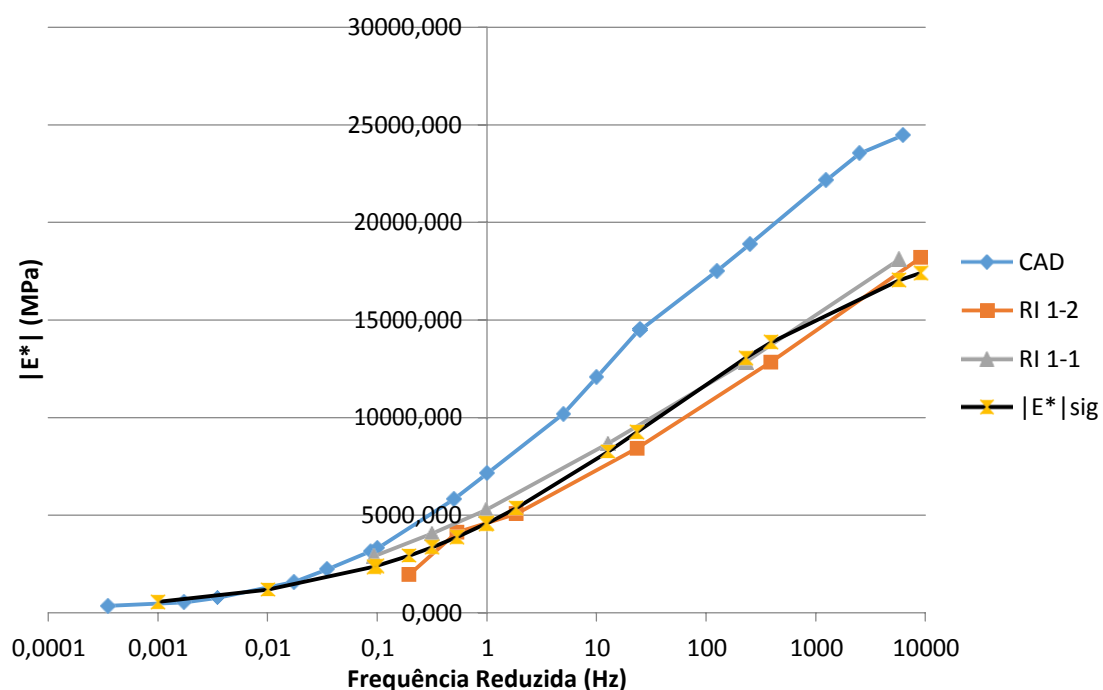


Figura 17: Comparação entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do CP 27.

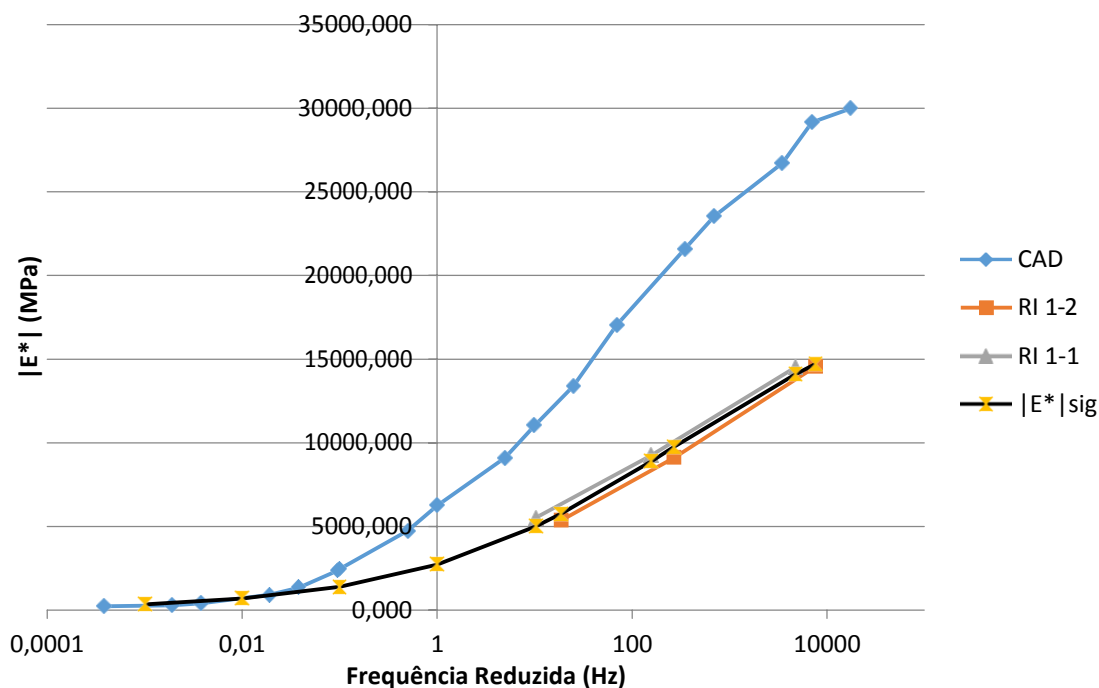


Figura 18: Comparação entre as Curvas Mestras de Módulo Dinâmico do CP 28.

4.4 Análise do teor de ligante

Após a realização dos ensaios de ressonância por impacto e obtenção dos resultados para gerar a curva mestra, realizou-se também o ensaio para adquirir o percentual de betume, com o uso do equipamento Rotarex. Para tal, utilizaram-se as premissas da norma DNER-ME 053/94. A massa do CP 02 foi medida e depois o mesmo foi colocado em estufa, em temperatura de 120°C durante uma hora. Retirou-se o corpo de prova e partiu-o para facilitar o despejo no aparelho. Com o CP dentro do rotarex, cobriu-se com papel filtro e acionou-se a ignição. O solvente utilizado foi gasolina.

Posteriormente à extração do ligante do CP, sobraram somente os agregados que teve a massa novamente medida para poder calcular o teor de ligante pela equação 14.

$$P = \frac{\text{peso do betume extraído}}{\text{peso da amostra total}} \times 100 \quad (14)$$

Para o CP 02:

$$P = \frac{456,3g - 411,0g}{456,3g} \times 100$$

$$P = 9,93\%$$

O objetivo deste ensaio foi a confirmação do teor de ligante dos corpos de prova enviados pelo CENPES, que dosou as misturas. No entanto, o valor do teor de ligante do CP 02, equivalente à mistura A-RJ-3045, seria de 5,5%, conforme dados da dosagem, quase a metade do computado. Acredita-se que a diferença entre os resultados se deu devido à análise

somente de um disco referente ao CP, já que os recebidos tiveram que ser retificados para a realização deste trabalho. É provável que na manipulação se tenha perdido material fino ou mesmo no disco escolhido existia uma maior concentração de material fino, o que faria o teor de ligante ser maior para envolver o material. O ensaio não foi realizado para as outras amostras devido à imprecisão verificada no método.

5 CONCLUSÃO

O ensaio de Ressonância por Impacto (RI) parte do fundamento de que todo corpo está em movimento de agitação, inclusive em seus átomos, segundo a mecânica das vibrações. A partir dessa teoria, pode-se estudar o comportamento mecânico de materiais, inclusive os viscoelásticos lineares, como as misturas asfálticas. Com o ensaio de RI determinou-se as frequências naturais amortecidas e, pela mecânica das vibrações, determinou-se o coeficiente de Poisson, além do módulo dinâmico e do ângulo de fase.

Construíram-se curvas mestras de módulo dinâmico para o ensaio de Compressão Axial Dinâmico e para o ensaio de Ressonância por impacto, as quais foram comparadas. Tal comparação só foi possível pela transformação das frequências de carregamento e naturais amortecidas, respectivamente, em frequências reduzidas, pelo uso do fator de deslocamento. Elaboraram-se modelos polinomiais para estes fatores e modelos sigmoidais para os módulos dinâmicos a fim de completar a curva mestra na região de baixa frequência (de 1Hz a 0,001Hz), ambos ajustados pelo software STATISTICA 7.

A validade do método proposto se deu ao comparar as curvas mestras geradas para cada corpo de prova. Notou-se que ambos os métodos estudados apresentaram valores de módulo e frequência muito próximos, principalmente na região de baixa frequência, além de comportamentos muito semelhantes no desenvolvimento das curvas, sobrepondo-se em alguns pontos.

6 ATIVIDADES COMPLEMENTARES

Auxílio nos ensaios realizados no laboratório para pesquisas de alunos de mestrado: compactação, caracterização, densidade real, CBR, adensamento, compressão simples, grau de dispersão, abrasão Los Angeles, RTCD (Resistência à Tração por Compressão Diametral), ponto de amolecimento.

REFERÊNCIAS

ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto). *RESOLUÇÃO NR 19*. 2006. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/legislacao/RESOLUCAO-NR-19.pdf>. Acesso em: Dezembro de 2016.

AASHTO T342 – *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. 2011.

ASTM C215 – *Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. 2008.

ASTM E1876 – *Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. 2009.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G. da, CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B.. *Pavimentação Asfáltica, formação básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro. 2006.

BETUSEAL. *As origens do asfalto*. 2014. Disponível em: <http://www.betuseal.com.br/origens-asfalto/>. Acesso em: Dezembro de 2016.

BIBLIOTECA DO ASFALTO. *Caracterização do Comportamento Mecânico e a Fadiga de Misturas Asfálticas*. Disponível em: http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos_conteudo/fatos_e_asfaltos/fatos_08.pdf. Acesso em: Dezembro de 2016.

COSTA, Gessyca Menezes. *Método de Ressonância por Impacto: Obtenção de Curvas Mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase em Misturas Asfálticas Brasileiras*. 2017. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

DNER-ME 053/94 – *Percentagem de betume em misturas betuminosas*.

GRECA ASFALTOS. *Catálogo de produtos*. 2011. Disponível em: http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos_conteudo/catalogo-produtos-greca-asfaltos.pdf. Acesso em: Dezembro de 2016.

INFRAESTRUTURA URBANA. *Pavimentação Asfáltica*. 2011. Disponível em: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/pavimentacao-asfaltica-os-tipos-de-revestimentos-o-maquinario-necessario-260588-1.aspx>. Acesso em: Dezembro de 2016.

KIM, D., KIM, Y. R. *Determination of Dynamic Modulus Values of Asphalt Mixtures Using Impact Resonance Testing of Thin Disk Specimens*. Journal of Testing Evaluation. 2016. DOI: 10.1520/JTE20150076.

KWEON, G., KIM, Y. R.. *Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test*. Journal of The transportation Research Board. 2006.

PAPAZIAN, H.S. *The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, Michigan, USA. 1962.

Pritz, T. *Frequency Dependences of Complex Modulus and Complex Poisson's Ratio of Real Solid Materials*. Journal of Sound and Vibration, n 214, pp 83-104. 1998.

RAO, S.. *Vibrações Mecânicas*. Ed. Pearson. 4ª edição. 2009.

RYDÉN, N.. *Determining the asphalt mastercurve from free-free resonant testing on cylindrical samples*. NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering. França. 2009.

RYDÉN, N., ULRIKSEN, P., PARK, C., MILER, R. *Portable Seismic Acquisition System (PSAS) for Pavement MASW*. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. DOI: 10.4133/1.2927140. SANSALONE, M., and STREETT, W. B.. Impact-Echo. 2001.

SOLETO, J. Jr., FRANÇA, L. N. F.. *Introdução às vibrações mecânicas*. Ed. Edgar Blücher. 2006